

## Um Retrato da Malha Aérea Brasileira

Guilherme S. Couto<sup>1</sup>, Ana Paula C. Silva<sup>2</sup>, Linnyer Beatrys Ruiz<sup>3</sup>, Fabrício Benevenuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG)

<sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

<sup>3</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade Estadual de Maringá (UEM)

{gscouto, ana.coutosilva, fabricio}@dcc.ufmg.br, linnyer@gmail.com

**Abstract.** *The air transportation network in a country has a great impact on the local, national and global economy. In this paper, we analyze the air transportation network in Brazil with complex network features to better understand its characteristics. We restrict our analysis to the domestic passenger flights operating according to the data provided by the Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Our results show that the air transportation network in Brazil should be better structured to meet the demands of the major events that will take place in the country in the coming years.*

**Resumo.** *A rede de transporte aérea de um país tem um grande impacto na economia local, nacional e global. Nesse trabalho, analisamos a malha aérea brasileira através de métricas de redes complexas para melhor entender suas características. Na análise apresentada foram considerados os dados dos vôos nacionais fornecidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Nossos resultados mostram que a malha aérea brasileira deverá ser melhor estruturada para atender as demandas dos grandes eventos que ocorrerão no Brasil nos próximos anos.*

### 1. Introdução

As redes de transportes têm um papel fundamental no cotidiano da população. Além do impacto na economia do país bem como no seu desenvolvimento, redes de transporte melhoram a qualidade de vida das pessoas. Dentre todas as redes de transporte, a rede aérea é uma das mais importantes, pois une pessoas distantes de uma maneira rápida e segura. Em alguns países, como EUA, o uso do transporte aéreo vem de décadas atrás. Entretanto, alguns países experimentaram essa explosão no uso do sistema de transporte aéreo somente há poucos anos [ANAC 2013].

O Brasil é um exemplo de país que teve um crescimento expressivo no uso da rede de transporte aéreo nos últimos 10 anos. Esse crescimento pode ser explicado por dois fatores: a melhoria da renda familiar brasileira e a queda dos preços das passagens aéreas. Em 2003, 37,3 milhões de passageiros voaram (29 milhões e 8 milhões de passageiros em voos nacionais e internacionais, respectivamente). Por outro lado, em 2012, o número de passageiros cresceu para 107 milhões ( $\approx$  89 milhões e 18 milhões de passageiros em vôos nacionais e internacionais, respectivamente). O número total de vôos quase dobrou de 611.091 vôos em 2003 (534 mil vôos nacionais e 76 mil vôos internacionais) para 1.126.907 vôos em 2012 (989 mil vôos nacionais e 137 mil vôos internacionais) [ANAC 2013].

Como a maioria das redes de transporte aéreo, a rede brasileira tem uma estrutura complexa, com muitos aeroportos e companhias aéreas, operando milhares de vôos nacionais e internacionais. Entender as propriedades estruturais fundamentais dessa rede é crucial para enfrentar apropriadamente o rápido crescimento que aconteceu nos últimos anos. Um dos desafios para ser enfrentado, por exemplo, é renovação da infraestrutura dos aeroportos.

Embora a existência de muitas análises governamentais sobre esse tópico, ainda existe a necessidade de uma análise mais profunda das propriedades topológicas da malha aérea brasileira. Esta análise geral possibilita identificar os aeroportos mais importantes e centrais, bem como testar a robustez da infraestrutura. A análise a partir da teoria de Redes Complexas [Newman 2003, Reka and Barabási 2002] provê um ferramental ideal para o entendimento da topologia e propriedades da rede. Acreditamos que os resultados apresentados neste artigo são importantes para o entendimento da estrutura da malha área brasileira, auxiliando possíveis mudanças estruturais que busquem melhorias no serviço prestado aos usuários.

Para a análise proposta neste artigo, foram coletados dados da *Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)*<sup>1</sup>, a autoridade de aviação civil que é responsável por regular o transporte aéreo brasileiro. Com os dados coletados, modelamos a rede de vôos nacionais vigentes no mês de outubro de 2013<sup>2</sup>. Assim, a malha aérea nacional foi representada por um grafo onde os nodos representam os aeroportos e as arestas são as ligações entre pares de aeroportos conectados por pelo menos um vôo. Foram considerados os vôos das 51 companhias aéreas que operam no espaço aéreo brasileiro (incluindo as quatro maiores companhias brasileiras: TAM, Gol/Webjet, Azul/Trip, Avianca). A análise proposta tem como objetivo aprofundar o entendimento das principais propriedades e características da malha aérea brasileira. As principais conclusões das nossas análises são as seguintes:

- A rede de transporte aéreo brasileiro possui características *Small-World* com baixo diâmetro e alto coeficiente de clusterização;
- As conexões dos aeroportos seguem uma distribuição de lei de potência, com alguns *hubs* conectados a aeroportos que possuem poucas conexões;
- O aeroporto de Viracopos (Campinas) é o aeroporto mais conectado e central na rede de vôos nacionais;
- Passageiros no Brasil precisam, em média, de 3 voos de conexão para chegarem ao seu destino final. O número máximo de conexões encontrado é 7, do Aeroporto de Confresa (Mato Grosso) ao Aeroporto de Pato de Minas (Minas Gerais);
- Os aeroportos mais centrais estão concentrados no Sul e na costa brasileira. Para atingir cidades que não estão nessas regiões são necessárias muitas conexões;
- A queda do aeroporto de Viracopos desconecta a rede em 6 subredes distintas, afetando 10% dos passageiros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Muitos trabalhos encontrados na literatura caracterizam e analisam a malha aérea de diversos países sob o ponto de vista nacional e mundial. Em [Guimerà et al. 2005] os autores analisam a estrutura global da rede mundial de transporte aéreo. Segundo a análise

<sup>1</sup><http://www.anac.gov.br/Default.aspx>

<sup>2</sup>Até o momento da submissão deste artigo, houve poucas mudanças na estrutura da rede considerando os dados disponibilizados pela ANAC.

apresentada, a rede segue características de lei de potência e *Small-World*, onde as cidades mais conectadas não são necessariamente as que são mais centrais. O artigo separa grupos de nodos (aeroportos) em comunidades, onde cada comunidade é formada pelos nós que estão mais conectados entre os membros da mesma comunidade. Além disso, os autores identificam o papel global de cada cidade basendo-se nos padrões de conexão intra-comunidade e inter-comunidade.

A principal proposta de [Cheung and Gunes 2012] é analisar características topológicas na rede dos EUA. Os autores mostram que a rede possui características do modelo *Small-World* e que, em média, passageiros precisam de 2 transferências antes de chegarem ao seu destino final. Além disso, nas últimas duas décadas, a rede tem crescido tanto no número de aeroportos quanto no número de rotas entre aeroportos, visando atender às demandas dos clientes.

Os autores em [Bagler 2008] analisam a rede de transporte aéreo na Índia. Esta rede segue a característica de *Small-World*, com alguns aeroportos atuando como *hubs* ligados a vizinhos de baixo grau. A rede de aeroportos chinesa é analisada em [Li and Cai 2004] e esta também segue o modelo *Small-World*. Curiosamente, as distribuições cumulativas de grau de ambas as redes obedecem a distribuição de lei de potência com dois regimes de diferentes expoentes. Já a rede aérea italiana foi analisada em [Guida and Maria 2007]. As análises mostraram que a rede também segue características de lei de potência.

Os resultados apresentados neste artigo complementam os esforços encontrados na literatura que visam a análise estrutural de diferentes malhas aéreas. Os resultados mais relacionados com o nosso trabalho são apresentados em [Oliveira et al. 2013]. No entanto, diferentemente do nosso objetivo que é a análise das características global e local da topologia da rede aérea, os autores se dedicam ao estudo da organização em *hub* dos aeroportos no Brasil. Eles mostram que o aeroporto de Guarulhos, em São Paulo (GRU), tem um papel fundamental em termos de número de vôos e conexões. Os autores também investigam a robustez da rede, considerando as mudanças ocorridas na malha aérea quando **somente** o GRU é removido da rede.

### 3. Malha Aérea Brasileira

#### 3.1. Conjunto de Dados

Muitas medidas - incluindo o número total de passageiros, número total de vôos, ou a quantidade total de carga - que quantificam a importância dos aeroportos brasileiros são compiladas e publicadas pela *Agência Nacional de Aviação Civil* (ANAC). Os dados são organizados em planilhas com a informação dos vôos nacionais e internacionais autorizados pela agência.

Nós restringimos nossa análise aos vôos de passageiros vigentes em 21 de outubro de 2013. Como os vôos não têm mudanças significativas, os dados coletados podem ser usados para representar uma visão estável da malha aérea. No período da coleta dos dados, existiam 3.579 vôos nacionais (vôos interestaduais e intraestaduais) e 419 vôos internacionais. O número total de aeroportos brasileiros era de 120, 15 deles operando vôos nacionais e internacionais. Um total de 53 aeroportos estrangeiros possuíam vôos de/para o Brasil. O número total de passageiros em cada vôo é o número máximo de

passageiros permitido em cada voo. Não foi possível ter acesso ao número de lugares ocupados em um dia específico para um determinado voo. Por isso, são apresentados valores de limite superior em relação ao número total de passageiros permitido em cada rota<sup>3</sup>.

**Tabela 1. Alguns Aeroportos Brasileiros.**

ICAO	Nome do Aeroporto	Cidade/Estado	ILS
SBGR	Governador André Franco Montoro	Guarulhos/SP	CAT II
SBKP	Viracopos	Campinas/SP	CAT I
SBGL	Galeão - Antônio Carlos Jobim	Rio de Janeiro/RJ	CAT II
SBBR	Presidente Juscelino Kubitschek	Brasília/DF	CAT II
SBCF	Tancredo Neves	Belo Horizonte/MG	CAT I
SBSV	Deputado Luís Eduardo Magalhães	Salvador/BA	CAT I
SBPA	Salgado Filho	Porto Alegre/RS	CAT I
SBSP	Congonhas	São Paulo/SP	CAT I
SBCT	Afonso Pena	Curitiba/PR	CAT II
SBRF	Gilberto Freyre	Recife/PE	CAT I
SBCY	Marechal Rondon	Cuiabá/MT	CAT I
SBEG	Eduardo Gomes	Manaus/AM	CAT I
SBRJ	Santos Dumont	Rio de Janeiro/RJ	-
SBFZ	Pinto Martins	Fortaleza/CE	CAT I
SBBE	Val de Cães/Júlio Cezar Ribeiro	Belém/PA	CAT I
SBRP	Leite Lopes	Ribeirão Preto/SP	-
SBGO	Santa Genoveva	Goiânia/GO	-
SBCG	Campo Grande	Campo Grande/MS	CAT I
SBNT	Augusto Severo	Natal/RN	CAT I

Algumas informações dos aeroportos encontrados nos dados coletados estão na tabela 1: o código ICAO<sup>4</sup>, o nome e a cidade de localização. Além desses dados, adicionamos a informação de ILS (Instrument Landing System)<sup>5</sup>. Este instrumento auxilia os pilotos nas operações de pouso, principalmente quando a visibilidade é limitada. O sistema é dividido em três categorias de abordagem: I, II e III. Por exemplo, na categoria “CAT I” o piloto precisa ter pelo menos 60 m de altitude de decisão<sup>6</sup> e 488 m de visibilidade enquanto na categoria “CAT IIIc”, o piloto pode pousar em qualquer condição de visibilidade. Podemos observar que grandes aeroportos no Brasil funcionam com o CAT mais simples, sendo extremamente suscetíveis ao fechamento devido a mudanças meteorológicas. Por exemplo, o Santos Dumont opera sem o auxílio deste aparelho e opera voos com grande número de passageiros (ligação Rio-São Paulo)<sup>7</sup>.

<sup>3</sup>Quando são consideradas métricas relacionadas ao número de passageiros em cada rota.

<sup>4</sup>O código ICAO (International Civil Aviation Organization) é atribuído para distinguir unicamente cada aeroporto

<sup>5</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/Instrument\\_Landing\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Instrument_Landing_System).

<sup>6</sup><http://www.decea.gov.br/cnsatm/glossario/dah-altitude-de-decisao/>

<sup>7</sup>Guarulhos está com o ILS IIIa instalado desde 2011 mas ainda não foi certificado.

### 3.2. Modelo da Malha Aérea

O foco da nossa análise é caracterizar a rede de vôos nacionais, com o objetivo de levantar questões que podem auxiliar a melhoria do serviço prestado no país. As métricas utilizadas neste artigo são as métricas tradicionais encontradas na área de Redes Complexas.

A rede brasileira de transporte aéreo é modelada através de um grafo direcionado [Bang-Jensen and Gutin 2008]  $\mathcal{G}_{nacional}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , onde  $\mathcal{V}$  é o conjunto de aeroportos e  $\mathcal{E}$  o conjunto de arestas. Uma aresta existe entre A e B, se existe pelo menos um vôo entre os aeroportos A e B. O grafo  $\mathcal{G}_{nacional}$  é um grafo ponderado [Bang-Jensen and Gutin 2008]. Para as métricas com o enfoque no estudo da estrutura topológica, o peso será igual a um, representando a conexão entre dois aeroportos. Nos casos onde queremos avaliar o total máximo de passageiros a serem transportados, é associado este valor aos pesos. O total de nodos do grafo é igual a 120. Já o total de arestas é igual a 726.

### 3.3. Métricas da Rede

A malha aérea brasileira foi caracterizada utilizando métricas clássicas da teoria de grafos (uma discussão mais detalhada em métricas pode ser encontrado em [Newman 2003, Reka and Barabási 2002]). Para a reconstrução e análise do grafo modelado foi utilizado o software Gephi [Bastian et al. 2009], que é uma plataforma de código aberto para visualização e manipulação de grafos.

#### *Graus de Entrada e Saída*

O grau de entrada do nó  $v$ ,  $k_{in}(v)$ , é o número total de arestas que chegam no nó. Da mesma maneira, o grau de saída de um nó  $v$ ,  $k_{out}(v)$  é o número total de arestas que partem do nó. Logo, o grau de um nó  $v$ ,  $k(v)$ , é dado pela soma de  $k_{in}(v)$  e  $k_{out}(v)$ . O grau médio,  $\langle k \rangle$ , de um grafo  $\mathcal{G}$  é dado por:

$$\langle k \rangle (\mathcal{G}) = \sum_{\forall v \in \mathcal{V}} k(v) / |\mathcal{V}|.$$

Os graus ponderados de entrada e saída são uma definição direta do grafo não ponderado, porém cada aresta possui um valor (peso).

#### *Menor Caminho do Grafo*

Seja  $P_{u,v}$  o conjunto de caminhos entre um dado par de nós  $u$  e  $v$ . O menor caminho  $l(u, v)$  é aquele que possui o menor número de saltos entre a origem e o destino. Seja também  $\mathcal{L}$  o conjunto de todos os menores caminhos  $l(u, v)$ ,  $\forall (u, v)$ . A média dos menores caminhos  $\langle l \rangle$ , de um grafo  $\mathcal{G}$  é dado por:

$$\langle l \rangle (\mathcal{G}) = \sum_{\forall l(u,v) \in \mathcal{L}} l(u, v) / |\mathcal{L}|.$$

*Diâmetro*

Seja  $l(u, v)$  o menor caminho entre os nós  $u$  e  $v$ . O diâmetro,  $d$ , é definido como sendo o maior caminho entre os menores caminhos do grafo, considerando qualquer par de nós da rede:

$$d(\mathcal{G}) = \max_{(u,v) \in \mathcal{V}} l(u, v).$$

A propriedade do diâmetro apresenta uma ideia da dispersão do grafo  $\mathcal{G}$ . Na rede de transportes aéreos, o diâmetro significa a viagem mais longe em números de saltos (conexões/escalas).

*Coefficiente de Clusterização*

O coeficiente de clusterização é definido como se segue. Em muitas redes, se o nó A está ligado ao nó B e o nó B ligado ao nó C, então, existe uma maior probabilidade de que o nó A também esteja ligado ao nó C. Em termos de topologia da rede, o coeficiente de clusterização significa a presença de um grande número de triângulos na rede (conjuntos de três nós conectados uns aos outros).

A definição do coeficiente de clusterização  $\mathcal{C}$  de  $\mathcal{G}$  é:

$$\mathcal{C}(\mathcal{G}) = \frac{3 \times \text{o número de triângulos da rede}}{\text{número de trios de vértices conectados}}.$$

Onde “trios conectados” representa um nó com arestas para pares desordenados de nós.

*Betweenness*

O betweenness  $\beta(v)$  de um nó  $v$  é a fração de menores caminhos conectando todos os pares de nós que passam por  $v$ . Em outras palavras, seja  $\sigma_{(j,k)}$  o número de menores caminhos entre os nós  $j$  e  $k$ , e  $\sigma_{(j,k)}(v)$  o número dos caminhos que passam pelo nó  $v$ . O betweenness de  $v$  é definido como:

$$\beta(v) = \sum_{j \neq v \neq k \in \mathcal{V}} \frac{\sigma_{(j,k)}(v)}{\sigma_{(j,k)}}.$$

**4. Discussão e Análise do Transporte Aéreo Brasileiro**

Esta seção descreve os resultados obtidos a partir da análise dos dados coletados. Primeiramente, a rede aérea brasileira é comparada com redes de outros países. Em seguida, uma análise mais detalhada sobre os vôos nacionais é apresentada. Por fim, analisamos a robustez da malha aérea brasileira.

**4.1. Comparação entre as Redes de Transporte Aéreo Brasileira e Estrangeiras**

A tabela 2 mostra a comparação da malha aérea brasileira e um conjunto de malhas estrangeiras estudadas na literatura [Guimerà et al. 2005, Bagler 2008, Li and Cai 2004, Cheung and Gunes 2012, Guida and Maria 2007].

Primeiro, pode-se notar que o grau do nó em  $\mathcal{G}_{\text{nacional}}$  segue uma lei de potência. Em segundo lugar, a média dos menores caminhos também é baixa, com poucos saltos

para se deslocar de um lugar para outro. Além disso, a malha brasileira tem um menor coeficiente de clusterização médio. Isto implica que há menos triângulos na rede, levando a uma baixa redundância de caminhos entre aeroportos. Os resultados revelam que a rede aérea brasileira segue uma estrutura similar quando comparada com as demais redes aéreas.

**Tabela 2. Análise Geral**

	Mundo	India	China	EUA	Italia	BRASIL
Média dos Menores Caminhos	4,4	4	2,067	3,241	3,74	<b>2,866</b>
Clusterização Média	0,62	0,6574	0,733	0,6208	0,1	<b>0,451</b>
Expoente da Lei de Potência	1,0	2,2 +/- 0,1	1,65	Parcial 1,0512	0,2/1,7	<b>1,0522</b>

#### 4.2. Propriedades Estruturais

Nesta seção, consideramos os 3.579 vôos domésticos operados, pelas diferentes empresas aéreas, nos 120 aeroportos brasileiros. A tabela 3 mostra as métricas analisadas. O grafo gerado é totalmente conectado, ou seja, é possível atingir todos os aeroportos a partir de qualquer outro. A conectividade dos aeroportos é baixa: em média, cada aeroporto se conecta a outros seis aeroportos (ou seja, o grau médio é igual 5% do número total de aeroportos). Além disso, o número médio de aeroportos que se conectam a outros dois aeroportos diferentes ao mesmo tempo é igual a 4,84. Este valor revela que a infraestrutura aérea brasileira é composta por muitos aeroportos que funcionam como pontes impactando diretamente na conectividade da rede. A remoção de uma aresta pode aumentar o número das conexões para um destino específico ou, no pior caso, desconectar a rede.

Os passageiros no Brasil precisam realizar, em média, 3 vôos para se deslocar de um lugar para outro (a média dos menores caminhos é igual a 2,86). Curiosamente, a maior viagem no Brasil necessita de 7 vôos (correspondente ao diâmetro do grafo). Esta viagem liga o Aeroporto de Confresa (Mato Grosso) ao Aeroporto de Pato de Minas (Minas Gerais) (as cidades são distantes apenas 1,472 km). Finalmente, o coeficiente de clusterização médio é de 0,451. Dado os aeroportos interconectados (A,B) e (A,C) a chance de conexão entre (B,C) é de 45%. Ou seja, na malha brasileira a formação de triângulos é bem menos provável do que em malhas aéreas de outros países, implicando em pouca redundância de conexões entre aeroportos.

O número máximo de passageiros transportados a cada semana é, em média, igual a 21.932 por aeroporto. Neste caso, a média não é um bom indicador de procura pelos aeroportos, já que alguns aeroportos podem atender mais de 100 mil passageiros por semana. Mais precisamente, 34 dos 120 aeroportos atendem mais de 21 mil passageiros por semana.

As características locais da estrutura da rede são analisadas a seguir. A análise local permite identificar os principais aeroportos do Brasil e seus papéis na operação global da rede de transporte aéreo. 93.3% dos aeroportos tem menos de 40 ligações. Apenas 8 aeroportos têm mais de 40 conexões. O aeroporto com mais conexões é o de Viracopos na cidade de Campinas (SBKP), com 105 conexões. A distribuição do grau do grafo segue o modelo de lei de potência, com poucos aeroportos atuando como *hubs*.

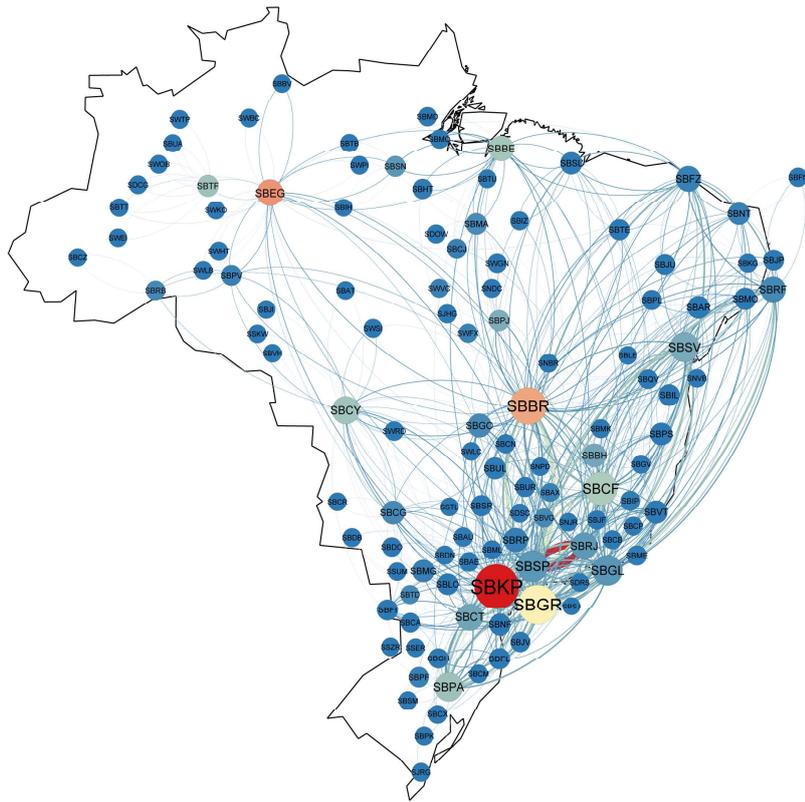


Figura 1. Rede aérea nacional.

Tabela 3. Métricas da rede de vôos nacionais.

Métrica	Valor
Componentes Conectados	1 (120 aeroportos)
Grau Médio	6,05 (5%)
Grau Médio Ponderado(passageiros)	21.932
Diâmetro	7
Média dos Menores Caminhos	2,866
Densidade do Grafo	0,051
Coefficiente de Clusterização Médio	0,451

Um dado interessante é que o Aeroporto de Viracopos desempenha um papel importante na infraestrutura nacional. Embora o aeroporto de Viracopos não atenda o maior número de passageiros por semana (esta posição é ocupada pelo Aeroporto de Guarulhos), este é o aeroporto que mais participa dos menores caminhos entre pares de aeroportos (maior *betweenness* conforme mostrado na tabela 4). Uma possível explicação para este fenômeno é criação da Companhia Aérea Azul<sup>8</sup>, que tem como seu principal *hub* o Aeroporto de Viracopos. Desta forma, um grande número de seus vôos passam por este aeroporto, aumentando a sua importância na rede de conexões nacionais.

Também é possível verificar a partir dos resultados das tabelas 4, 5 e 6 que o conjunto de aeroportos mais centrais se repetem considerando as três métricas calculadas.

<sup>8</sup><http://www.voeazul.com.br/>

**Tabela 4. Os 10 aeroportos com maior (*Betweenness*).**

Nome(ICAO)	Betweenness	Conexões	Passageiros
Viracopos(SBKP)	0,30	105	256.234
Manaus(SBEG)	0,22	34	82.937
Brasília(SBBR)	0,20	74	450.647
Guarulhos(SBGR)	0,15	86	602.801
Confins(SBCF)	0,09	59	280.340
Belém(SBBE)	0,08	30	118.535
Cuiabá(SBCY)	0,08	38	81.963
Tefé(SBTF)	0,08	14	3.523
Porto Alegre(SBPA)	0,08	41	197.394
Palmas(SBPJ)	0,05	12	18.714

**Tabela 5. Os 10 aeroportos com o maior número de conexões (grau).**

Nome(ICAO)	Conexões	Passageiros	Betweenness
Viracopos(SBKP)	105	256.234	0,30
Guarulhos(SBGR)	86	602.801	0,15
Brasília(SBBR)	74	450.647	0,20
Confins(SBCF)	59	280.340	0,09
Congonhas(SBSP)	52	530.779	0,03
Galeão(SBGL)	48	331.433	0,03
Salvador(SBSV)	46	230.771	0,05
Porto Alegre(SBPA)	41	197.394	0,08
Cuiabá(SBCY)	38	81.963	0,08
Curitiba(SBCT)	36	216.513	0,04

**Tabela 6. Os 10 aeroportos com o maior número máximo de passageiros.**

Nome(ICAO)	Passageiros	Conexões	Betweenness
Guarulhos(SBGR)	602.801	86	0,15
Congonhas(SBSP)	530.779	52	0,03
Brasília(SBBR)	450.647	74	0,20
Galeão(SBGL)	331.433	48	0,03
Santos Dumont(SBRJ)	313.519	34	0,03
Confins(SBCF)	280.340	59	0,09
Viracopos(SBKP)	256.234	105	0,30
Salvador(SBSV)	230.771	46	0,05
Curitiba(SBCT)	216.513	36	0,04
Porto Alegre(SBPA)	197.394	41	0,08

A figura 1 mostra a rede aérea brasileira. O tamanho do nó é proporcional ao seu grau e a cor ao seu valor de *betweenness* (a cor vermelha significa maior *betweenness*). Os aeroportos mais importantes não estão bem distribuídos ao longo do território brasileiro. Os maiores aeroportos estão localizados nas regiões mais populosas e ricas do Brasil. Os aeroportos mais conectados estão concentrados na região Sudeste, principalmente na costa. Em alguns casos, passageiros das regiões Norte e Nordeste precisam se deslocar para algum aeroporto *hub* localizado na região Sudeste, mesmo quando o destino é uma das cidades na região Norte ou Nordeste. Além do tempo de viagem mais longo, este fato também aumenta o preço das passagens. O único aeroporto da região Norte e Nordeste que possui um papel importante na infraestrutura aérea brasileira é o aeroporto de Manaus (SBEG). A maioria dos aeroportos nestas regiões tem poucas conexões e não fazem parte dos menores caminhos da rede (nós representados pela cor azul).

As arestas na figura 1 representam o número total de passageiros entre dois aeroportos e sua espessura é proporcional ao número total de passageiros transportados na rota. O número total de passageiros entre os aeroportos de Congonhas e Santos Dumont (148.352 passageiros por semana) é mais que o dobro da segunda conexão com mais passageiros. A rota Congonhas - Santos Dumont concentra uma grande quantidade de passageiros dado a importância, no cenário nacional, das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro tanto no que diz respeito a economia quanto ao número total de habitantes.

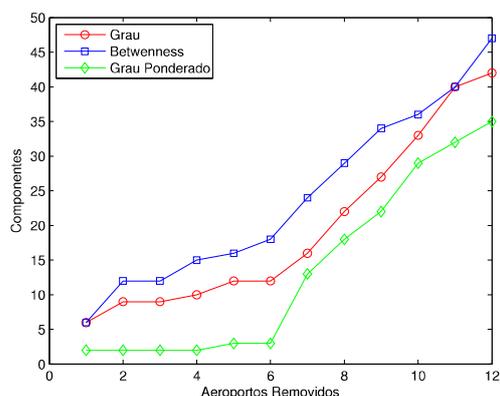
#### 4.2.1. Análise da Robustez

A seguir avaliamos a robustez da rede de transporte aéreo no Brasil. Este tipo de análise é extremamente importante para entender as mudanças que ocorrem na estrutura da rede quando determinados aeroportos são fechados ou por problemas meteorológicos ou por problemas operacionais. Para tal análise, verificamos o impacto da remoção dos principais aeroportos no total de componentes do grafo e no total de passageiros que deixam de ser transportados devido a estas falhas. A ideia é realizar remoções consecutivas destes aeroportos até que a componente gigante do grafo seja reduzida à metade do seu tamanho original.

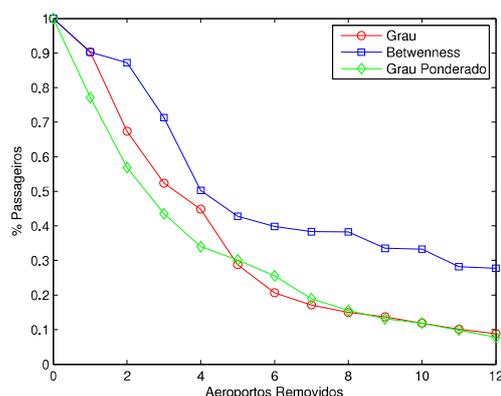
A seleção dos aeroportos a serem removidos segue a ideia encontrada em [Albert et al. 2000]. A cada remoção, foram escolhidos os aeroportos com os maiores valores de *betweenness* e número máximo de passageiros que estes podem atender. As figuras 2 e 3 mostram os resultados das consecutivas remoções. Considerando-se o número de componentes, o pior caso acontece quando são removidos os aeroportos com maiores valores de *betweenness*. Ao remover os três aeroportos com maior *betweenness* (Viracopos, Manaus e Brasília), a rede se fragmenta em doze componentes. Como era esperado, considerando a porcentagem dos passageiros, o pior caso ocorre quando os aeroportos que suportam mais passageiros são afetados. Ao remover os quatro primeiros aeroportos (Guarulhos, Congonhas, Brasília e Galeão), o número total de passageiros atendidos cai para quase 40% da capacidade total quando não existem falhas na rede.

Esta análise simples mostra que a rede aérea brasileira possui baixa robustez frente a mudanças topológicas. A coluna ILS da tabela 1 mostra que os aeroportos brasileiros não possuem equipamentos avançados para lidar com problemas meteorológicos, e por isso, estão muito suscetíveis a suspensão do funcionamento dado mudanças climáticas.

Viracopos (SBKP), por exemplo, que é o aeroporto mais importante no cenário nacional possui somente o instrumento ILS CAT I, aumentando drasticamente as chances de ser fechado em decorrência de mudanças climáticas. Desta forma, melhorias na infraestrutura dos aeroportos devem ser realizadas para evitar o efeito em cascata do cancelamentos dos vôos, evitando um caos aéreo no país.



**Figura 2. Alterações no número de componentes pelo número total de aeroportos removidos.**



**Figura 3. Alterações na percentagem de passageiros pelo número total de aeroportos removidos.**

## Agradecimentos

Essa pesquisa teve o apoio de CNPq, CAPES, INCT NAMITEC e FAPEMIG.

## 5. Conclusões

Neste trabalho analisamos a rede de transporte aéreo brasileiro. O entendimento de como a rede está estruturada e como mudanças topológicas afetam o seu funcionamento são essenciais para o desenvolvimento de infraestruturas capazes de suportar um grande número de passageiros, oferecendo um serviço de qualidade aos mesmos.

Comparada com as redes de outros países, a rede de transporte aéreo no Brasil tem propriedades *Small-World* e as conexões dos aeroportos seguem uma distribuição de lei de potência. O principal aeroporto no cenário nacional é o Aeroporto de Viracopos, em Campinas. Passageiros precisam, em média, de 3 conexões para chegarem ao destino final. O maior número de conexões necessárias para atingir um destino é igual a 7.

A análise de robustez mostrou que a malha aérea brasileira é extremamente frágil, dado que os aeroportos não possuem muitas ligações comuns entre si. Desta forma, o fechamento de um aeroporto pode causar o efeito em cascata nos demais aeroportos. Logo, equipamentos mais sofisticados devem ser instalados evitando o colapso do funcionamento da malha aérea em decorrência à mudanças meteorológicas, por exemplo.

São esperados 600 mil turistas para a Copa do Mundo e 400 mil para os Jogos Olímpicos<sup>9</sup>. Desta forma, a infraestrutura da malha aérea brasileira tem que estar preparada para atender satisfatoriamente ao grande número de passageiros durante estes eventos.

<sup>9</sup>Informações fornecidas pelo presidente da Embratur e o site do Ministério do Turismo.

## Referências

- Albert, R., Jeong, H., and Barabasi, A. (2000). Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794):378–382.
- ANAC (2013). *Yearbook of Air Transport. Statistical and Economic Data 2012*. Agência Nacional de Aviação, Brasília, DF, Brazil.
- Bagler, G. (2008). Analysis of the airport network of india as a complex weighted network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(12):2972 – 2980.
- Bang-Jensen, J. and Gutin, G. Z. (2008). *Digraphs: Theory, Algorithms and Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd edition.
- Bastian, M., Heymann, S., and Jacomy, M. (2009). Gephi: An open source software for exploring and manipulating networks.
- Cheung, D. and Gunes, M. (2012). A complex network analysis of the united states air transportation. In *Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM), 2012 IEEE/ACM International Conference on*, pages 699–701.
- Guida, M. and Maria, F. (2007). Topology of the italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure? *Chaos, Solitons & Fractals*, 31(3):527 – 536.
- Guimerà, R., Mossa, S., Turtschi, A., and Amaral, L. A. N. (2005). The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities’ global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(22):7794–7799.
- Li, W. and Cai, X. (2004). Statistical analysis of airport network of china. *Phys. Rev. E*, 69:046106.
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 45(2):167–256.
- Oliveira, D., Carvalho, M., and Menezes, R. (2013). Using network sciences to evaluate the brazilian airline network. In Du, D.-Z. and Zhang, G., editors, *Computing and Combinatorics*, volume 7936 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 849–858. Springer Berlin Heidelberg.
- Reka, A. and Barabási (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.*, 74:47–97.
- Tarjan, R. (1971). Depth-first search and linear graph algorithms. In *Switching and Automata Theory, 1971., 12th Annual Symposium on*, pages 114–121.